

시뮬레이션과 모형 시험을 이용한 어업실습선의 조종 성능 평가

이정관 · 황두진^{1*}

전남대학교 실습선, ¹전남대학교 해양생산관리학과

Evaluation of Maneuvering Performance of a Fishing Training Vessel Using Simulation and Model Tests

Jung-Kwan Lee and Doo-Jin Hwang^{1*}

Training Ship, Chonnam National University, Yeosu 56926, Republic of Korea

¹Department of Marine Production Management, Chonnam National University, Yeosu 56926, Republic of Korea

Simulations and model tests were conducted to evaluate the maneuverability of the training vessel Saedongbaek. As the first training vessel to comply with the special purpose ship code, it was equipped with a controllable pitch propeller and a flap rudder to enhance maneuvering performance. The Shipgen simulation results were compared with model tests conducted at the Swedish State Shipbuilding Experimental Establishment. In particular, turning and zig-zag tests were performed under both one-pump and two-pump operating conditions of the steering gear hydraulic system. The results demonstrated that the two-pump condition provided better maneuverability, with a smaller tactical diameter and shorter advance. Similarly, the zig-zag tests indicated faster and more accurate steering responses under two-pump conditions. In all cases, the starboard tactical diameter was larger than that of the port side, suggesting better turning performance toward port. Although the vessel is <100 m and is not strictly subject to IMO standards, it still satisfied most criteria, with the two-pump condition meeting all requirements. Furthermore, the simulation and model test results exhibited similar trends, confirming the reliability of the analysis.

Keywords: Fishery training vessel, Maneuverability, Model test, Shipgen simulation, Flap rudder

서 론

어업실습선은 해양 운항 실습 및 연구 조사를 목적으로 운항되는 선박으로, 안정적인 항해 능력과 함께 정밀한 조종 성능이 필수적이다. 특히 학생들의 안전한 어구 투·양묘 실습과 좁은 해역 내 기동성, 비상 상황 대응력은 선박의 운항 안전성과 직결된다. 이에 따라, 최근 건조되는 어업실습선은 특수목적선 코드(special purpose ship code)를 적용하여 설계 단계부터 엄격한 안전 기준을 요구하고 있다. 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서 제시하는 조종 성능 기준 MSC. 137(76)을 충족하는 것은 이러한 설계 과정의 핵심요소이며(IMO, 2002), 따라서 실습선의 조종 성능을 정밀하게 평가하고 최적화하는 과정은 선박의 실용성과 교육 현장의 안전성을 높이는 데 필수적이다. 선박의 조종 성능을 추정하는 방

법으로는 크게 두 가지가 있다. 하나는 조종 운동 방정식과 기본 제원을 활용하여 조종 응답을 수치적으로 계산하는 시뮬레이션 기법이며, 다른 하나는 축소 모형을 이용한 모형 시험을 통해 실험적으로 조종 성능을 분석하는 방법이다(Matsumoto and Suemitsu, 1980; Yasukawa, 1992; Kopp, 1993; Yasukawa and Yoshimura, 2015). 시뮬레이션 기법은 선박 설계 초기 단계에서 빠르고 저렴하게 조종 성능을 예측할 수 있으며 반복 실험이 용이한 장점이 있다. 그러나 난류, 프로펠러와 타의 상호작용과 같은 복잡한 유체역학적 현상을 완벽하게 반영하기는 어렵다. 반면, 모형 시험은 실제 해양 조건과 유사한 환경에서 수행되며, 보다 정밀하고 신뢰성 높은 데이터를 제공할 수 있다. 다만 모형선 제작과 시험 운영에 높은 비용과 시간이 요구되는 단점이 있다. 따라서 두 방법을 상호 보완적으로 활용하는 것이 보다 신뢰성 있는 조종 성능 평가를 가능하게 한다. IMO는 선

*Corresponding author: Tel: +82. 61. 659. 7126 Fax: +82. 61. 659. 7129

E-mail address: djhwang@jnu.ac.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0241>

Korean J Fish Aquat Sci 59(3), 241-251, June 2026

Received 22 April 2026; Revised 11 May 2026; Accepted 20 May 2026

저자 직위: 이정관(1등 항해사), 황두진(교수)



Fig. 1. Procedure for estimating ship maneuvering performance using shipgen program.

박의 운항 안전성을 확보하기 위해 1993년 선박의 조종 성능에 관한 잠정 기준(interim standards for ship maneuverability) A. 751(18)을 채택하였으며(IMO, 1993), 이후 해사안전위원회(Maritime Safety Committee, MSC)에서는 조종 성능 기준 MSC. 137(76)을 도입하였다(IMO, 2002). 이 기준은 수선 간장 100 m 이상의 모든 선박에 대해 의무적으로 적용된다. 본 연구의 대상인 2,000톤급 어업실습선은 수선 간장 100 m 미만이며, flap rudder를 장착한 선박으로 해당 기준의 의무 적용 대상은 아니나, 실습 교육 목적과 선주의 요구사항을 반영한 건조사양서에 따라 IMO 조종 성능 기준을 충족하도록 설계 및 건조되었다. 이에 따라 조종 성능 기준을 목표 성능 지표로 설정하여 시험을 수행하였다.

선박의 조종 성능을 평가하기 위한 기존의 연구 사례로는 시뮬레이션 기법과 모형 시험을 활용한 다양한 시도들이 보고되고 있다. 먼저 유조선의 조종 모형 시험(Kim and Molyneux, 2008)과 자유 항주 시험을 이용한 고속 컨테이너선의 조종 성능 분석(Kim et al., 2002) 등 실선 현상을 모사하기 위한 실험적 연구가 수행된 바 있으며, 최근에는 자유 항주 모형 시험을 통한 조종 성능 추정(Cho et al., 2024) 연구가 지속되고 있다. 또한 구속 모형 시험을 통해 조종 성능을 정밀하게 추정하거나(Kim et al., 2009), 가상 구속 모형 시험을 활용한 성능 평가 기법(Sung and Park, 2015) 등이 제시되었다. 시뮬레이션 기법을 활용한 연구로는 어업실습선 백경호의 조종 추정 연구(Kim et al., 2021)가 대표적이며, 수치해석을 기반으로 운용 조건 변화에 따른 조종 성능의 민감도를 분석(Lee et al., 2024b)하거나 타형상 변화에 따른 조종 성능의 차이를 규명하는 연구(Lee and Yang, 2025)도 활발히 진행되고 있다. 그러나 flap rudder를 장착한 어업실습선의 시뮬레이션 및 모형 시험을 통한 조종 성능 분석이나 steering gear의 two pump 시스템을 이용한 조종 성능 검증에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 일반적으로 조종 성능 시험은 one pump 시스템을 기준으로 수행되나, 본 연구에서는 보다 정밀한 성능 분석과 조타 성능 향상 방안 마련, 운항자 및 실습생의 안전성 확보를 목적으로 one pump와 two pump 시스템을 각각 적용한 조종 시험을 수행하였다. 이를 통해 turning test와 zig-zag test와 같은 주요 조종 시험 항목을 중심으로 성능을 비교 분석하였다.

따라서 본 연구는 2,000톤급 어업실습선의 조종 성능을 시뮬레이션과 모형 시험을 통해 종합적으로 평가하고, 해당 성능이 국제적으로 요구되는 기준을 충족하는지를 검토하였다. 또한, 이 결과를 실제 선박 운항과 교육에 적용 가능한 형태로 해석함으로써, 실습선의 조종 성능 향상 및 운항 안전성 제고에 기여

하고자 하였다.

재료 및 방법

Shipgen 시뮬레이션 프로그램

Shipgen (SSPA, Gothenburg, Vastra gotaland, Sweden)은 선박의 기본 제원과 유체역학적 특성을 바탕으로 다양한 조종 성능 시험을 수행할 수 있는 시뮬레이션 프로그램으로, 본 연구에서는 Shipgen을 이용하여 turning test와 zig-zag test를 수행하였다. Shipgen 시뮬레이션 프로그램에 의한 선박 조종 성능 추정 절차는 Fig. 1과 같이 전반적인 흐름을 나타내며, 먼저 배수량(Δ), 선박 길이(L), 폭(B), 흘수(T), 방형비척계수(C_b), 선체형상, 추진·조타시스템 사양 등을 입력한다. 이때 입력값은 모형 시험에서 사용된 조건과 동일하게 설정하였으며, Shipgen에서 활용된 어업실습선의 선도(lines)와 조종 성능 해석 프로그램 화면은 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

입력된 파라미터는 선박의 질량 중심 및 유체력 계산에 사용되며, 선박 운동 방정식의 초기 조건으로 사용된다. 그 다음 외부 환경 조건을 설정하는데, 본 연구에서는 설계상 Design draft 5.2 m (even keel)와 선속 13.4 knots에서 시험을 수행하였으며, 조류·바람·파도 등 외부 영향을 배제한 평수역 조건을 가정하였다. 이러한 조건은 모형 시험과 동일한 조건을 적용함으로써 시뮬레이션 결과와의 비교·검증에 적합하다고 판단하였다. 이어서 조타 시스템의 주요 파라미터인 조타각, 조타 효율, 조타 응답시간 등을 입력하고, 특히 steering gear hydro pump의 운전 조건에 따른 조종 성능의 변화를 분석하기 위해, 조타 시스템의 핵심 파라미터인 타각 변화율(rudder angle rate)을 두 시

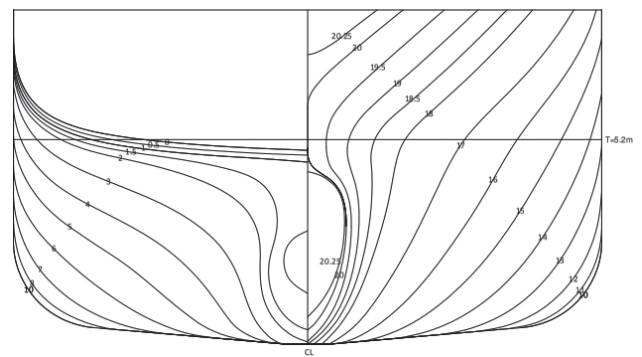


Fig. 2. Lines plan of a fishing training vessel. CL, Center line; T, Draft.

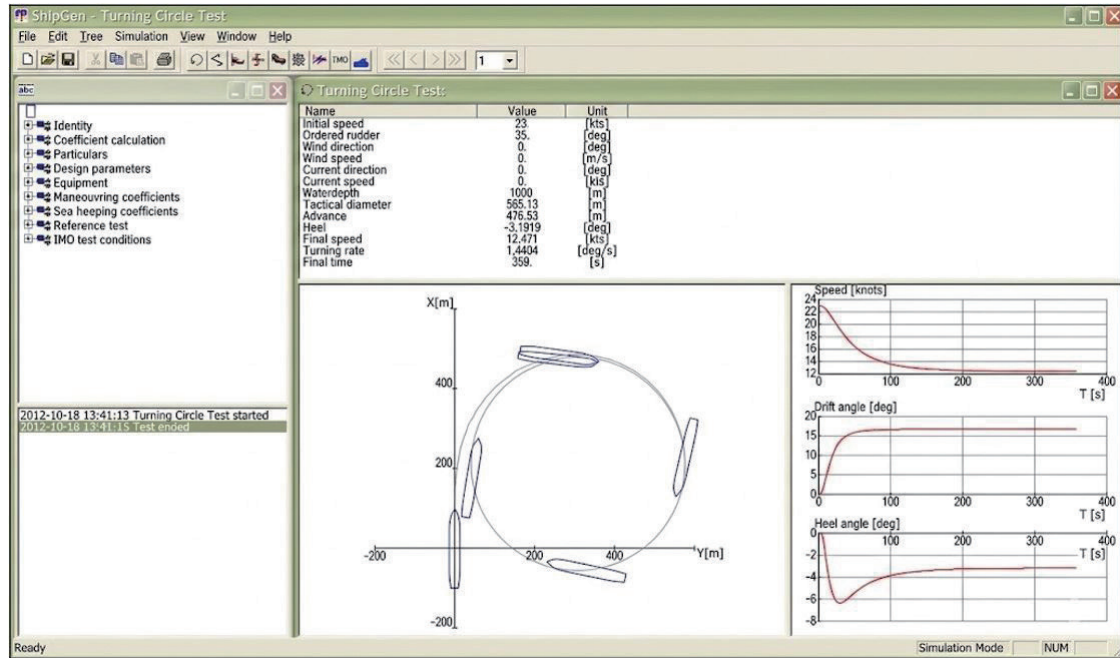


Fig. 3. The Shipgen program used for maneuvering performance analysis.

나리으로 구분하였다. One pump 작동은 통상 항해 시 사용되는 설정으로, 단일 유압 펌프만 가동하여 시스템 부하를 최소화하는 상태이며, 이때 타각 변화율은 약 3.1°/s이다. 반면, two pump 작동은 두 개의 유압 펌프를 동시에 가동해 작동유량을 극대화함으로써 타의 응답 속도를 높인 상태를 의미하고, 타각 변화율은 약 6.2°/s로 설정하였다. 이 수치는 새동백호의 실제 steering gear 사양에 근거한 것으로, 펌프 대수가 조타 응답 속도 및 선박 추종 성능에 미치는 영향을 정량적으로 비교하기 위한 설정이다. 입력된 데이터를 바탕으로 전후 방향(surge), 횡 방향 sway, 선수 동요(yaw) 운동을 포함하는 3자유도(three degrees of freedom, 3-DOF) 운동 방정식을 적용하였다. Newton의 운동 제 2법칙($F=ma$)을 기반으로 각 운동 상호간의 연성을 고려하면 다음 식 (1), 식 (2), 식 (3)으로 표현된다.

$$m(\dot{u}+vr)=X_H+X_p+X_R \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$m(\dot{v}+ur)=Y_H+Y_p+Y_R \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$I_z \dot{r}=N_H+N_p+N_R \quad \dots\dots\dots(3)$$

여기서 m 은 선박의 질량, I_z 는 선박의 관성 모멘트이며, u , v 는 각각 선박의 종 방향 및 횡 방향 속도, r 은 요 속도(yaw rate)를 의미한다. 또한 X_H , Y_H , N_H 는 선체에 의해 발생하는 힘과 모멘트를 나타내며, X_p , Y_p , N_p 는 프로펠러에 의해 발생하는 힘과 모멘트, X_R , Y_R , N_R 는 rudder에 의해 발생하는 힘과 모멘트

를 의미한다. 특히, 조종 성능에 결정적인 타 횡력 Y_R 과 요잉 모멘트 N_R 은 유체역학적 관계를 이용해 식 (4) 및 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$Y_R = \frac{1}{2} \rho V^2 A_R C_Y(\delta) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$N_R = \frac{1}{2} \rho V^2 A_R C_N(\delta) L_R \quad \dots\dots\dots(5)$$

ρ 는 물의 밀도, V 는 선속, A_R 는 타 면적, $C_Y(\delta)$, $C_N(\delta)$ 는 조타각(δ)에 따른 계수, L_R 는 러더 중심과 선체 중심간의 거리이다. Shipgen은 이러한 관계를 기반으로 선박의 조종 성능을 수치적으로 예측하며, 모든 입력 파라미터가 설정된 이후 시뮬레이션을 수행하여 선박의 조종 성능을 정량적으로 분석하였다.

모형 시험

조종 성능 시험(turning test, zig-zag test)은 스웨덴 선박 연구소(Swedish State Shipbuilding Experimental Establishment, SSPA) 사각 수조(39 m × 88 m × 3 m)에서 수행하였다(SSPA, 2017). 실험에 사용된 모형선은 어업실습선 새동백호의 선체 형상으로 제작되었으며, 주요 제원은 Table 1에 정리하였다. 모형선은 축척비 1:13.2를 적용하여 고밀도 Divinycell로 정밀 제작되었으며, WARTSILA에서 설계한 가변피치 프로펠러와 1기의 flap rudder를 장착하여 실선의 추진 및 조타 시스템을 구현하였다. Flap rudder와 프로펠러 형상 및 제원은 Table 2

와 Fig. 4에 나타내었으며, 시험 환경은 시뮬레이션과 동일하게 Design draft 5.2 m (even keel), 선속 13.4 knots 및 평수역 조건을 유지하였다.

데이터 수집에는 SSPA의 고정밀 자료 취득 시스템(data acquisition system)과 다중 모션 캐리지(multi motion carriage)가 활용되었으며, Fig. 5는 본 연구에 사용된 모형선의 조종 성능 시험 장면을 나타낸 것이다. 자유 항주 시험 시 모형선은 전용 측정 암(measuring arm)을 통해 3-DOF 운동 데이터를 실시간으로 기록한다. 시험 절차는 캐리지가 목표 선속까지 가속한 후 모형선을 분리하면, 모형선이 자가 추진 및 자동 조정 시스템에 의해 선회 및 지그재그 기동을 수행하는 방식으로 진행되었다. 특히 실제 운항 환경을 정밀하게 모사하기 위해 시뮬레이션

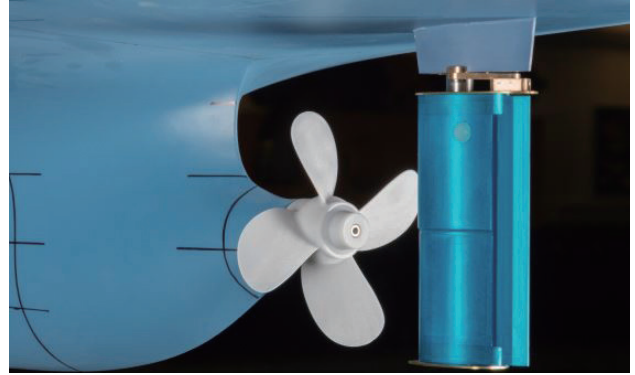


Fig. 4. Shape of model ship's rudder and propeller.

Table 1. Particular of model ship

Characteristic	Real ship	Model ship
Scale ratio	1	1/13.2
L.O.A (m)	96.45	7.31
L.B.P (m)	85.0	6.44
Breadth (m)	15.0	1.14
Draft (m)	5.2	0.39
Displacement (m ³)	3,893	1.69

L.O.A., Length overall; L.B.P, Length between perpendiculars.

Table 2. Particular of flap rudder and propeller

Flap rudder		Propeller	
Type	Flap	Type	CPP
Height at stock model (m)	0.27	Diameter model (m)	0.25
Chord length model (m)	0.15	Number of blades	4
Area ratio (%)	1.59	Turning direction	Right
		Pitch ratio	0.84
		Blade area ratio	0.544

CPP, Controllable pitch propeller.

Table 3. Standards maneuverability in IMO

Ability	Test	IMO standard
Turning ability	Turning test with maximum rudder angle	Advance length < 4.5 L Tactical diameter < 5.0 L
Yaw checking & course keeping ability	10°/10° zig-zag test	1 st overshoot angle 10°, if L/V is less than 10 s 20°, if L/V is 30 s or more; and (5+1/2[L/V])°, if L/V is 10 s or more but less than 30 s
		2 nd overshoot angle 25°, if L/V is less than 10 s 40°, if L/V is 30 s or more; and (17.5+0.75[L/V])°, if L/V is 10 s or more, but less than 30 s
	20°/20° zig-zag test	1 st overshoot angle < 25°

IMO, International Maritime Organization.

과 동일하게 one pump (3.1/s) 및 two pump (6.2/s) 운전 조건에 따른 타각 변화율을 축척비에 따라 환산 적용하였으며, 프로펠러는 토크 제한 없이 일정한 회전 속도로 구동하여 조종 응답의 정확성을 확보하였다.

선박 조종 성능 평가 기법 및 IMO 기준

IMO는 선박의 조종 성능 미흡으로 인한 해양 사고를 방지하고자 2002년 조종 성능 표준인 MSC. 137(76)을 채택하였다. 본 기준은 수선 간장 100 m 이상 선박을 대상으로 하나, 본 연구에서는 대상 선박의 조종 특성을 객관적으로 평가하고 steering gear hydro pump 운전 조건에 따른 조종 성능 유효성을 검증하기 위해 해당 기준을 준용하였다(Table 3). 첫 번째 평가 항목인 선회 성능(turning ability)은 최대 타각 35°에서 선박의 기동성을 평가하는 지표로, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 선회종거(advance), 선회형거(transfer), 전술 선회경(tactical diameter)을 통해 분석된다. 두 번째로 변침 성능(yaw checking) 및 보침성(course keeping ability) 평가를 위해 10°/10° 및 20°/20° zig-zag 시험을 수행한다. 시험 절차와 구성을 Fig. 7에 나타내었으며, 타각 명령에 대한 조타 응답의 신속성과 안정성을 나타내는 overshoot angle을 측정한다. 대상 선박은 flap rudder를 장

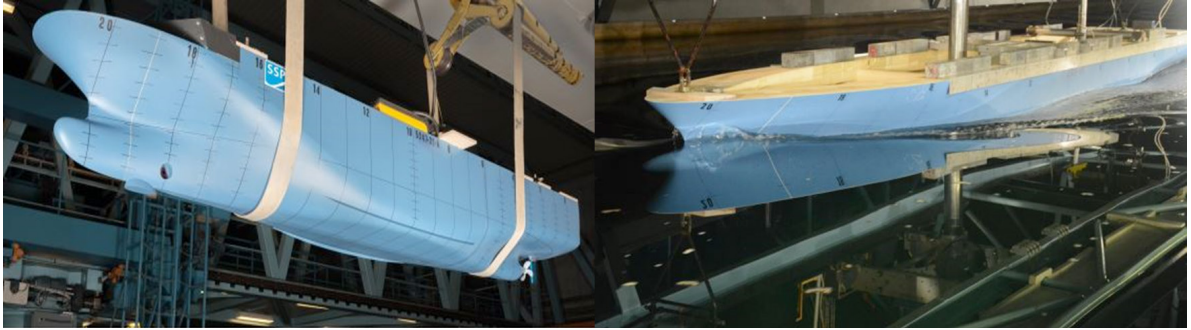


Fig. 5. Photo of maneuvering performance test of a fishery training vessel.

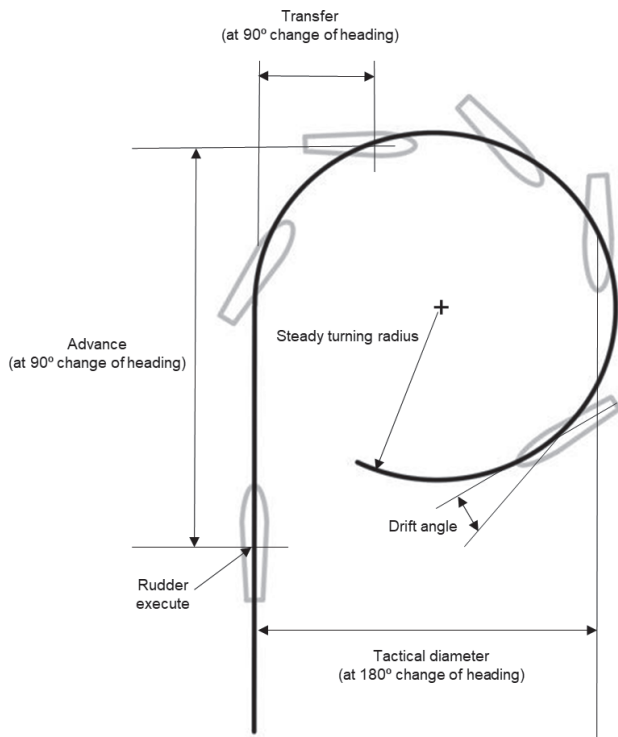


Fig. 6. Schematic diagram of turning test.

착한 100 m 미만 선박으로 기준 강제 적용 대상은 아니지만, Shipgen 시뮬레이션과 모형 시험 결과를 IMO 기준과 대조함으로써 펌프 운전 대수 변화가 실제 운항 안전성에 미치는 기여도를 정량적으로 분석하였다.

결 과

시뮬레이션과 모형 시험의 선회 성능 비교(One pump: Rudder rate 3.1°/s)

대상 선박의 선회 성능을 정량적으로 추정하고 비교·분석하기 위해 one pump 조건에서 rudder rate 3.1°/s로 설정한 후 좌

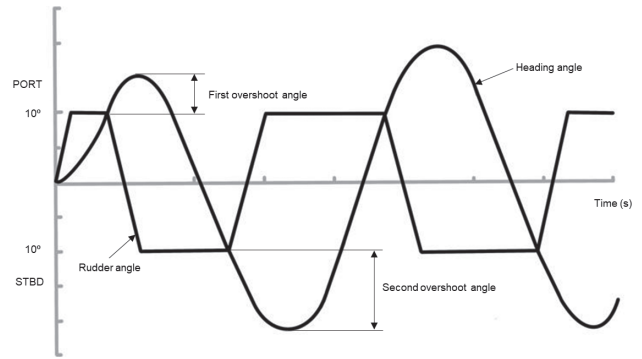


Fig. 7. Schematic diagram of zig-zag test.

현 및 우현 각각 35° 타각에 대한 turning test를 수행하였다. 시험은 Shipgen 시뮬레이션과 SSPA에서 수행된 모형 시험을 동일 조건 하에 실시하였으며, Fig. 8은 시뮬레이션과 모형 시험을 통한 선회권 비교 결과를 나타낸 것이다. 각 시험 결과로부터 선회종거(advance), 선회횡거(transfer), 전술 선회경(tactical diameter)을 계측하였으며, 이에 대한 정량적 비교 결과는 Table 4에 요약하였다. 시뮬레이션과 모형 시험 모두 IMO 조종 성능 기준을 충족하는 것으로 나타났으며, 좌현 및 우현 각각의 타각 조건에서의 비교 결과는 다음과 같다. 좌현 35° 타각의 경우, 전

Table 4. Comparison of turning motion test results for Saedong-baek (rudder rate 3.1°/s)

		Simulation	Model ship	IMO criteria
STB'D 35°	Advance (m)	204 (2.4 L)	213 (2.5 L)	< 4.5 L
	Transfer (m)	75.1 (0.883 L)	67 (0.784 L)	
	Tactical diameter (m)	162 (1.9 L)	162 (1.9 L)	< 5.0 L
PORT 35°	Advance (m)	202 (2.38 L)	207 (2.43 L)	< 4.5 L
	Transfer (m)	75 (0.88 L)	66 (0.774 L)	
	Tactical diameter (m)	161 (1.89 L)	154 (1.81 L)	< 5.0 L

IMO, International Maritime Organization.

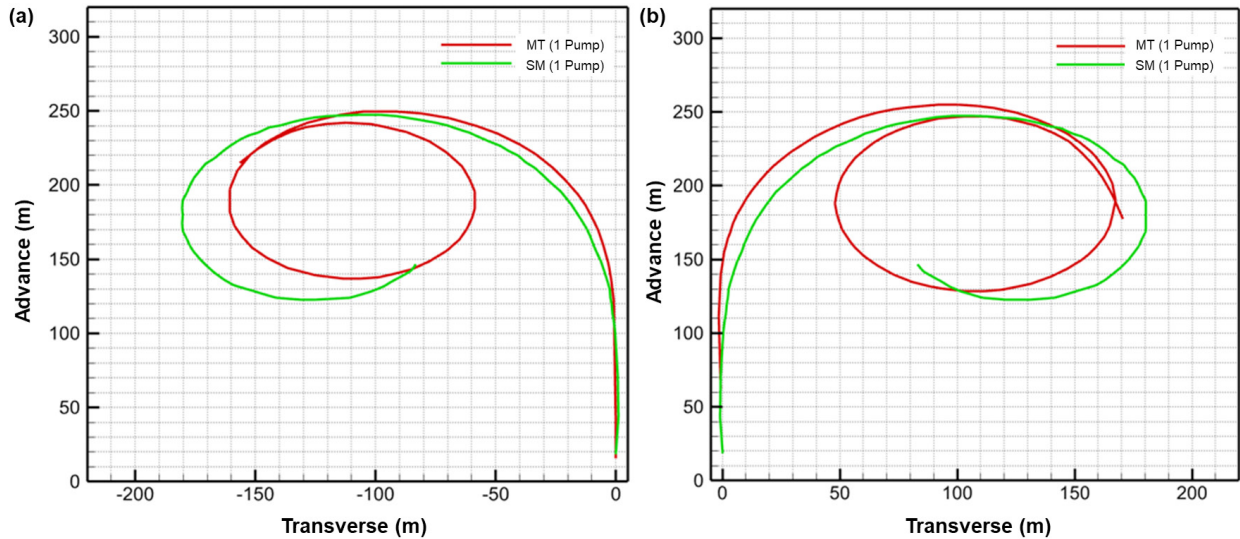


Fig. 8. Comparison of turning motion between simulation and model test (rudder rate 3.1°/s). a, PORT; b, STB'D.

술 선회경은 시뮬레이션에서 161 m로 나타나 모형 시험의 154 m보다 지름이 약 7 m (4.55%) 크게 나타났다. 선회종거는 모형 시험에서 207 m로 시뮬레이션의 202 m 대비 5 m (2.48%) 더 길게 측정되었으며, 선회횡거는 모형시험에서 66 m로 시뮬레이션의 75 m보다 9 m (12%) 짧은 결과를 보였다. 우현 35° 타각의 경우, 전술 선회경은 시뮬레이션과 모형 시험 모두 동일하게 162 m로 측정되었으며, 선회종거는 모형 시험이 213 m로 시뮬레이션의 204 m보다 약 9 m (4.41%) 길게 나타났다. 선회 횡거는 모형 시험에서 67 m, 시뮬레이션에서는 75.1 m로 8.1 m (10.79%) 차이를 보였다. 한편, 좌현 및 우현 선회경의 비교 결과, 시뮬레이션에서는 우현(162 m)이 좌현(161 m)보다 지름이 약 1 m (0.62%) 크며, 모형 시험에서는 우현 (162 m)이 좌현 (154 m)보다 8 m (5.2%) 크게 나타났다. 이를 통해 두 실험 모두에서 우현 선회권이 좌현 선회권 보다 크게 형성됨을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션과 모형 시험의 선회 성능 비교(Two pump: Rudder rate 6.2°/s)

One pump 실험에 이어 two pump 설정으로 전환한 뒤, 좌·우현 35° 타각 조건에서 시뮬레이션과 모형 시험을 수행하였다. 실험 결과는 Fig. 9 및 Table 5에 나타내었으며, one pump 실험과 동일하게 시뮬레이션과 모형 시험 간 우현의 선회종거, 선회 횡거, 전술 선회경을 비교하였다. 실험 결과는 모두 IMO의 조종 성능 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

좌현 35° 타각의 경우, 전술 선회경은 시뮬레이션에서 157 m, 모형 시험에서 154 m로 나타나 시뮬레이션 결과가 지름이 약 3 m (1.95%) 크게 나타났다. 선회종거는 190 m로 시뮬레이션 181 m보다 9 m (4.97%) 길게 나타났으며, 선회횡거는 모형 시험이 65 m, 시뮬레이션이 74 m로 9 m (12.16%) 짧게 나타났

다. 우현 35° 타각의 경우, 전술 선회경은 시뮬레이션이 159 m, 모형 시험이 160 m로 거의 동일한 값을 보였다. 선회종거는 모형 시험이 196 m로 시뮬레이션 187 m보다 9 m (4.81%) 길게 나타났으며, 선회횡거는 모형 시험이 66 m, 시뮬레이션이 74.8 m로 8.8 m (11.77%) 짧게 나타났다. One pump 실험과 마찬가지로 좌현과 우현 모두에서 선회횡거의 차이가 다른 변수들보다 크게 나타났다. 좌현과 우현의 비교 결과, 시뮬레이션의 전술 선회경은 좌현 157 m, 우현 159 m로 우현이 약 2 m (1.27%) 크게 나타났다. 모형 시험은 좌현 154 m, 우현 160 m로 우현이 6 m (3.9%) 더 크게 나타났다. One pump 실험과 마찬가지로 two pump 조건에서도 우현 선회권이 좌현 선회권보다 크게 형성되는 경향이 나타났다.

One pump와 two pump 시스템의 선회 성능 비교

Fig. 10와 Fig. 11은 시뮬레이션과 모형 시험을 통해 수행된 선회 성능 결과를 나타낸 것으로, one pump 및 two pump 조건

Table 5. Comparison of turning motion test results for Saedong-baek (rudder rate 6.2°/s)

		Simulation	Model ship	IMO criteria
STB'D 35°	Advance (m)	187 (2.2 L)	196 (2.3 L)	< 4.5 L
	Transfer (m)	74.8 (0.88 L)	66 (0.775 L)	
	Tactical diameter (m)	159 (1.87 L)	160 (1.89 L)	< 5.0 L
PORT 35°	Advance (m)	181 (2.13 L)	190 (2.24 L)	< 4.5 L
	Transfer (m)	74 (0.87 L)	65 (0.769 L)	
	Tactical diameter (m)	157 (1.85 L)	154 (1.81 L)	< 5.0 L

IMO, International Maritime Organization.

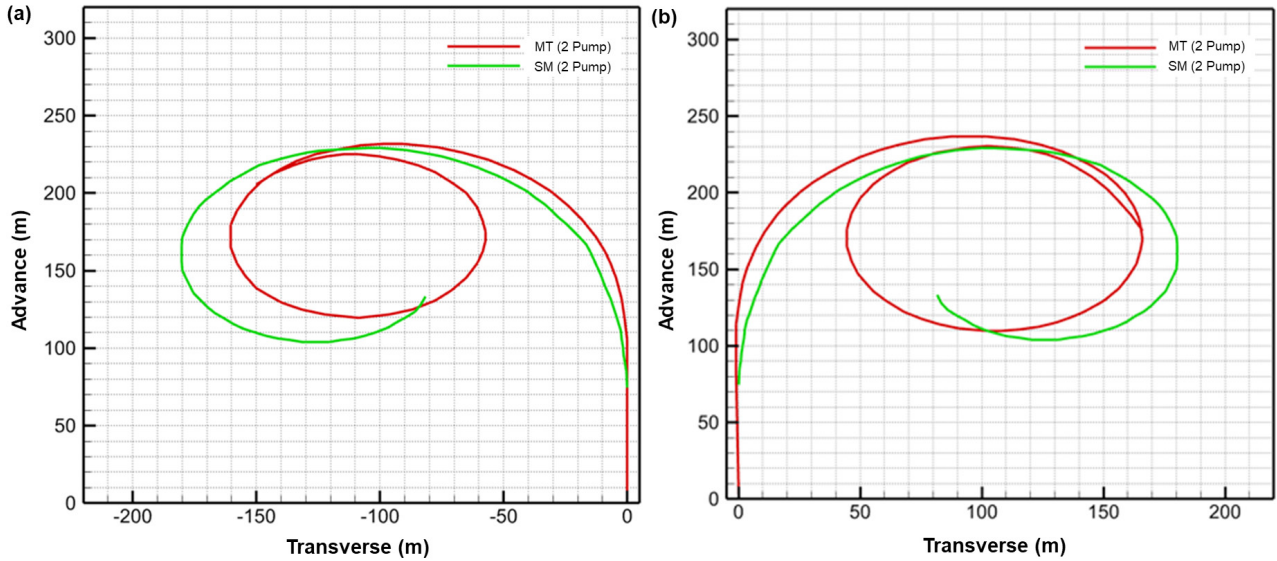


Fig. 9. Comparison of turning motion between simulation and model test (rudder rate 6.2°/s). a, PORT; b, STB'D.

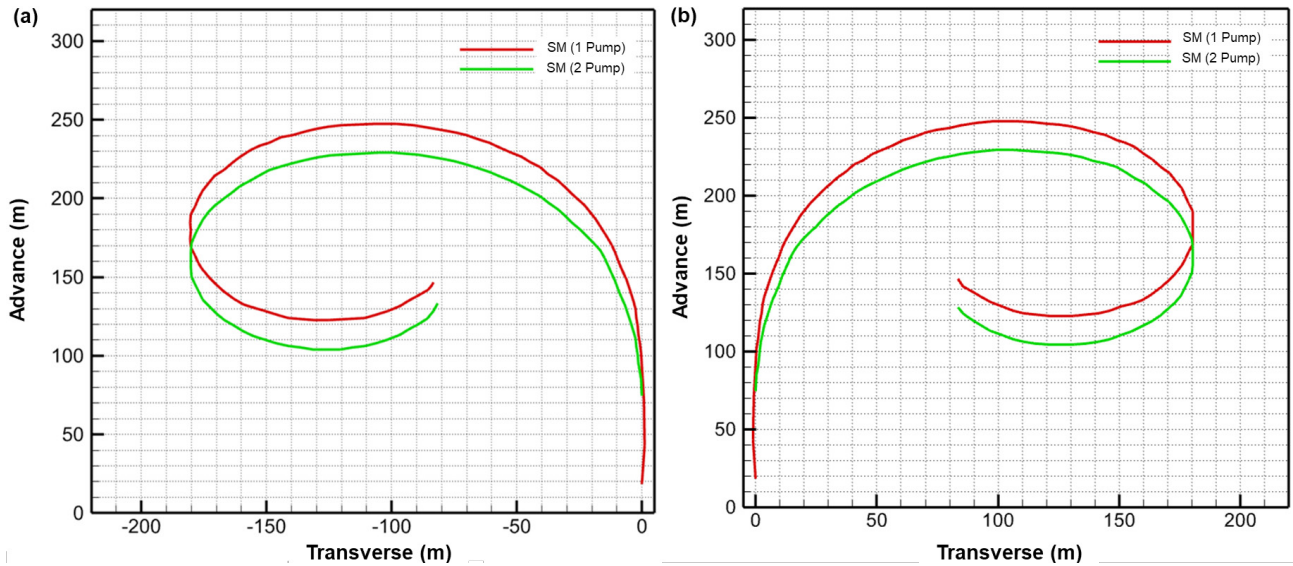


Fig. 10. Comparison of turning motion simulations with one pump and two pump systems. a, PORT; b, STB'D.

에서 35° 좌·우현 타각에 대한 선회 성능을 비교하였다. 실험 결과, 선회종거, 선회횡거, 전술 선회경은 모두 IMO 조종 성능 기준을 충족하는 것으로 나타났다. 특히, 시뮬레이션과 모형 시험 모두에서 one pump와 two pump 간의 선회경 차이는 크지 않았으나, two pump 조건에서 전반적으로 더 작은 선회경이 관찰되었다. 또한, 선회종거의 경우 two pump 조건에서 one pump 보다 짧게 나타나는 경향을 보였으며, 이는 러더의 반응 속도 증가 및 유체역학적 효율 향상에 기인하여 선박이 보다 신속하게 목표 선회 궤적을 형성할 수 있기 때문으로 판단된다.

시뮬레이션 및 모형 시험을 통한 zig-zag 조종 성능 비교

Zig-zag test의 대표적인 시뮬레이션 및 모형 시험 결과를 Fig. 12에 나타내었으며, 각 시험에서 도출된 zig-zag 성능 수치는 Table 6과 Table 7에 정리하였다. 대상 선박의 L/V ratio [LBP (m)/speed (m/s)]는 선박이 수선 간장 (LBP) 만큼 전진하는데 소요되는 시간을 기준 시간으로 나타낸 값이다. 본 연구에서는 이 값을 약 12.31 s로 계산하였다. 이에 따라 IMO 조종 성능 기

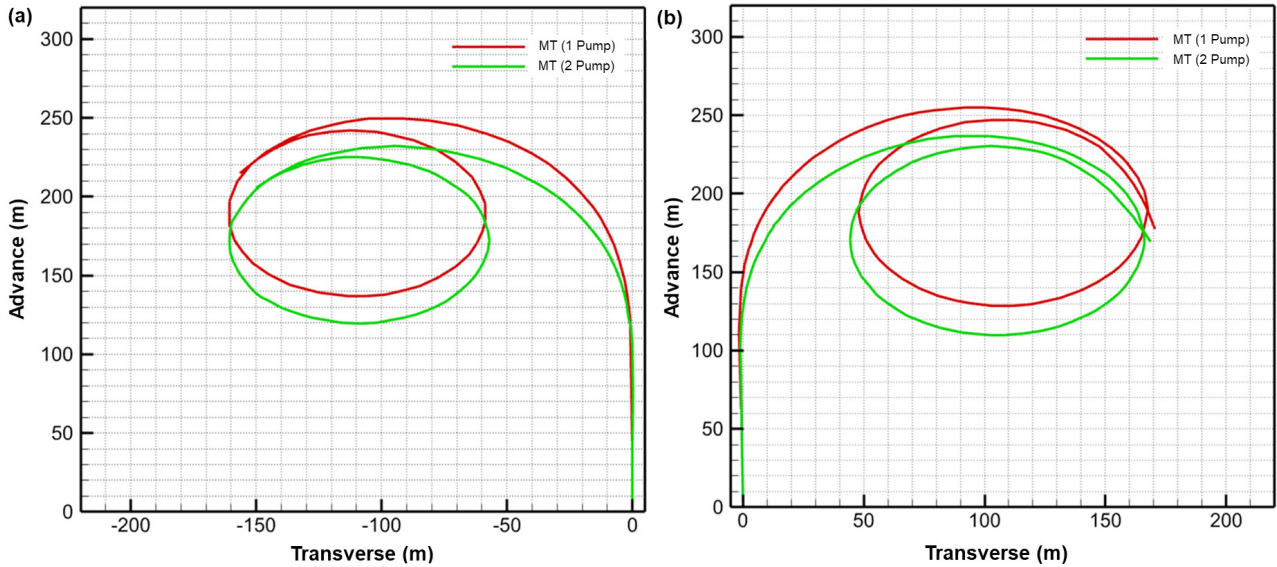


Fig. 11. Comparison of model test results for turning motion with one pump and two pump systems. a, PORT; b, STB'D.

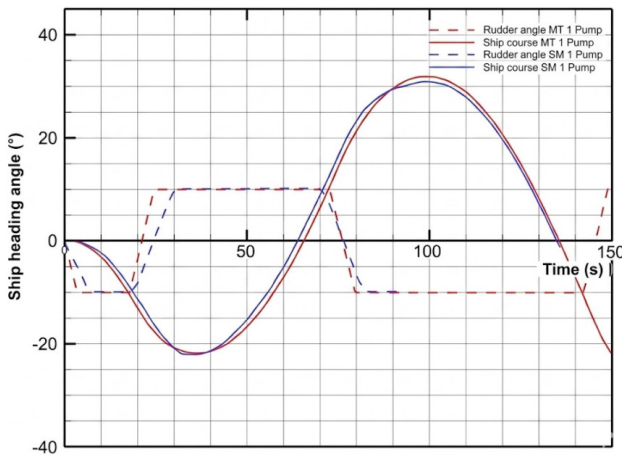


Fig. 12. 10°/10° zig-zag test results of simulation and model ship (STB'D, rudder 3.1°/s).

준에 의거하여 10°/10° zig-zag test의 1st 및 2nd overshoot angle은 각각 11.2°와 26.7° 이하, 20°/20° zig-zag test는 1st overshoot angle이 25° 이내일 것을 요구한다. 시험 결과, two pump 시스템

을 사용한 경우에는 시뮬레이션과 모형 시험 모두에서 IMO 기준을 만족하였으나, one pump의 경우 일부 기준을 초과하는 결과를 나타냈다. 구체적으로 one pump를 이용한 10°/10° zig-zag test에서 시뮬레이션과 모형 시험의 1st overshoot angle은 각각 11.6°, 11.8°로 기준보다 0.4°, 0.6° 초과하였다. 20°/20° zig-zag test에서는 시뮬레이션과 모형 시험이 각각 29.8°, 26°로 기준보다 4.8°, 1° 초과한 것으로 나타났다.

Fig. 12는 one pump 조건에서 우현으로 10° 타각을 주는 10°/10° zig-zag test 결과를 시뮬레이션과 모형 시험으로 비교한 궤적을 나타낸 것이다. 1st overshoot angle은 시뮬레이션에서 11.6°, 모형 시험에서 11.8°로 0.2° 차이를 보였고, 2nd overshoot angle은 각각 19.5°, 21.9°로 2.4° 차이를 나타냈다. 반면, two pump 조건에서는 1st overshoot angle은 시뮬레이션 9.4°, 모형 시험 9.6°로 0.2° 차이를 보였고, 2nd overshoot angle은 각각 15.9°, 17.8°로 1.9° 차이를 보였다. 전반적으로 two pump 조건에서 시뮬레이션과 모형 시험은 매우 유사한 결과를 나타냈으며, 궤적의 경향 또한 동일한 패턴을 보였다. 두 실험 모두 약 10 s 부근에서 타각 변화로 인한 궤적 기울기 변화가 급격하게 나타났으며, 20 s 부근에서 1st overshoot angle이 발생하였다. 이후 약 70 s 부근에서 2nd overshoot angle이 발생하는 등 시간

Table 6. Comparison of 10°/10° zig-zag test results for the Saedongbaek

		Simulation	Model ship	L/V (s)	IMO criteria
STB'D	One pump (Rudder: 3.1°/s)	1 st overshoot angle (°)	11.6	11.8	< 11.2 (5+1/2[L/V])
		2 nd overshoot angle (°)	19.5	21.9	< 26.7 (17.5+0.75[L/V])
	Two pump (Rudder: 6.2°/s)	1 st overshoot angle (°)	9.4	9.6	< 11.2 (5+1/2[L/V])
		2 nd overshoot angle (°)	15.9	17.8	< 26.7 (17.5+0.75[L/V])

IMO, International Maritime Organization.

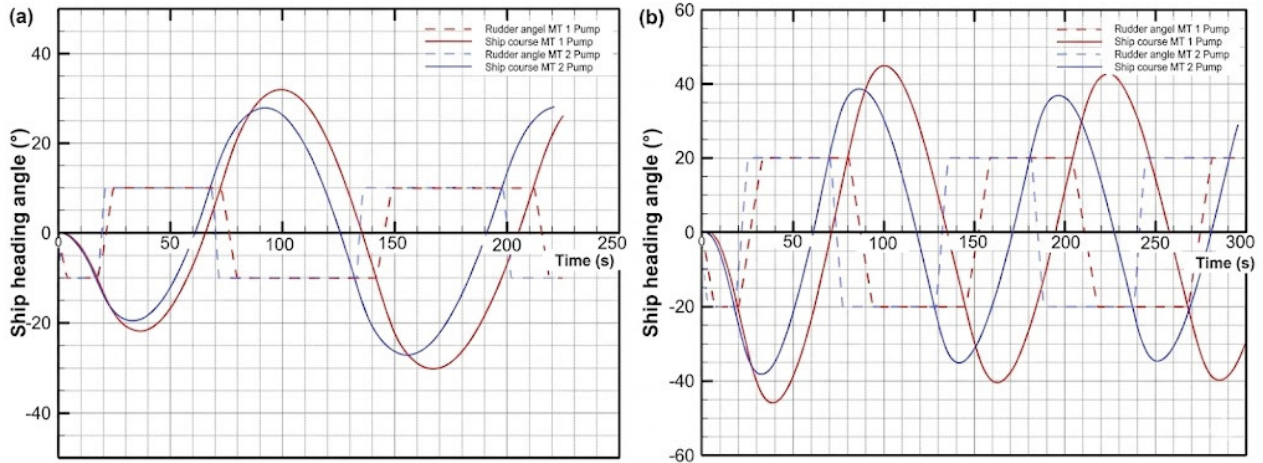


Fig. 13. Comparison of zig-zag test results of the model ship with one pump and two pump system. a, 10°/10° zig-zag test; b, 20°/20°, zig-zag test.

대별 조종 응답 경향이 시뮬레이션과 모형 시험 모두에서 유사하게 나타났음을 확인할 수 있었다. 우현으로 타각을 20° 부여하는 zig-zag test 결과는 시뮬레이션과 모형 시험 각각에 대해 Table 7에 나타내었다. One pump 시스템을 이용한 시험에서 1st overshoot angle은 시뮬레이션 결과가 29.8°로 나타난 반면, 모형 시험에서는 26.0°로 약 3.8°의 차이를 보였다. Two pump 시스템을 이용한 시험의 경우, 1st overshoot angle은 시뮬레이션에서 22.6°, 모형 시험에서 18.3°로, 두 결과 간 약 4.3°의 차이가 확인되었다. 20°/20° zig-zag test는 10°/10° 시험에 비해 시뮬레이션과 모형 시험 간 overshoot angle의 정량적 차이가 다소 크게 나타났다.

One pump와 two pump 시스템의 zig-zag 조종 성능 비교

One pump와 two pump 시스템을 적용한 모형 시험의 zig-zag 궤적 비교 결과는 Fig. 13에 나타내었다. 조종 성능을 평가하는 주요 지표인 1st 및 2nd overshoot angle을 기준으로 분석한 결과, one pump 시스템에서는 1st overshoot angle이 IMO 기준을 근소하게 초과하여 일부 불만족하였으나, two pump 시스템에서는 1st 및 2nd overshoot angle 모두 IMO 조종 성능 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 두 시스템 모두 10°/10° zig-zag test에서 유사한 궤적의 경향을 보였으며, 1st overshoot angle은 약 20 s 경과 시점에서 발생하고, 2nd overshoot angle은 약 70 s 시

점에서 형성되는 공통된 시간 분포를 나타냈다. 또한, 20°/20° zig-zag test에서도 두 시스템 간 overshoot angle의 정량적 차이는 다소 존재하였지만, 궤적 상의 전체적인 흐름 및 overshoot angle의 발생 시점은 유사한 경향을 보였다. 이는 타각이 커질수록 유동의 비선형성이 증가하면서 overshoot angle의 편차가 확대되었음을 시사하며, two pump 시스템이 조종 반응성 및 침로 복원 성능 측면에서 상대적으로 우수한 특성을 가지는 것으로 판단된다.

고 찰

본 연구에서 수행된 어업실습선 새동백호의 시뮬레이션 및 모형 시험 결과를 종합적으로 분석한 결과, 본선의 조종 성능은 단순한 선형적 특성을 넘어 조타 계통의 기계적 설정과 추진기 후류의 복합적인 유체역학적 상호작용에 의해 결정됨을 확인할 수 있었다. 우선 steering gear hydro pump 설정에 따른 기동성 변화를 살펴보면, turning test와 zig-zag test 결과 모두에서 two pump 시스템이 one pump에 비해 확연히 우수한 조종 응답성을 보였다. 특히 two pump 조건에서 선회중거(advance)가 유의미하게 짧아지고 overshoot angle이 감소한 것은 pump 추가가동으로 인해 타각 변화율(rudder rate)이 3.1°/s에서 6.2°/s로 상승하며 조타기가 목표 각도에 도달하는 시간이 단축되었기 때문이다. 여기서 two pump의 타각 속도를 one pump의 정확

Table 7. Comparison of 20°/20° zig-zag results for the Saedongback

			Simulation	Model ship	L/V (s)	IMO criteria
STB'D	One pump (rudder: 3.1°/s)	1 st overshoot angle (°)	29.8	26.0	12.31	< 25
	Two pump (rudder: 6.2°/s)	1 st overshoot angle (°)	22.6	18.3		

IMO, International Maritime Organization.

히 2배로 설정한 근거는 유압 조타 시스템의 물리적 구동 원리에 기초한다. 일반적으로 선박용 조타기는 동일 용량의 유압 펌프가 병렬로 연결된 구조를 가지며, 두 대의 펌프를 동시 가동할 경우 공급되는 작동유 유량이 산술적으로 배증되어 타 판을 밀어주는 실린더의 속도가 선형적으로 배가 되기 때문이다. 이는 실제 새동백호의 조타기 제조사 사양에 의거한 설정이며, IMO에서 규정하는 최대 타각 상황에서의 응답 시간 기준을 충족하기 위한 수치이다. 본 연구에서는 이러한 기계적 설계 근거를 바탕으로 펌프의 증설 운전이 조종 성능에 미치는 잠재적 영향력을 정량적으로 비교·분석하였다. 이러한 경향은 추진 시스템은 상이하나 2축 2펌프 시스템을 사용하는 나라호의 연구(Kim et al., 2017)에서 펌프 가동 수에 따라 조타 응답성이 향상된다는 결과와 일관된 흐름을 보이며, 어업실습선 새동백호와 같은 flap rudder를 장착한 선박에서도 조타 계통의 동력 확보가 조종 안정성 및 기동력과 직결되는 핵심 요소임을 의미한다.

좌·우 선회 성능의 불평형성 측면에서는 시뮬레이션과 모형 시험 모두에서 우현 선회권이 좌현보다 크게 형성되는 경향이 뚜렷하게 관찰되었다. 선회권의 크기는 일반적으로 방형비적 계수(C_b), 흘수(T), 선체 경사, 유속 및 외력 등 다양한 요소의 영향을 받지만, 본 연구는 외력을 배제한 정수 조건에서 수행되었으므로 이러한 차이는 우회전 프로펠러를 장착한 본선의 기하학적 특성과 프로펠러 회전 방향에 따른 횡압력 발생에서 기인할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 실제로 동일한 우회전 프로펠러를 탑재한 실습선 백경호(Lee et al., 2024a)의 선행 연구에서도 우 선회 시 선회경이 더 크게 나타난 바 있으며, 이는 프로펠러 회전 방향에 따라 좌 선회 시 프로펠러 후류가 러더에 효과적으로 작용하여 조타력이 증대되는 반면, 우 선회 시에는 후류가 러더에 비효율적으로 작용하거나 방해가 발생하여 선회 반응이 둔화됨을 시사하는 것으로 해석할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 프로펠러 회전 방향에 따른 횡압력 변화를 직접 검증하지는 못하였으므로, 향후 이에 대한 정량적인 분석을 통해 해당 가설을 검증할 필요가 있다. 따라서, 본 시험 결과는 좌 선회 시 선회 성능이 더 우수함을 시사하며, 운항자는 실 운항 시 이러한 조종 특성을 고려하여 좌현 선회를 보다 효율적인 조종 전략으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 동일 선행인 아라호의 실선 시험에서도 동일하게 우 선회 시 선회권이 더 크게 나타난 바 있다(Ahn et al., 2020). 시뮬레이션 및 모형 시험은 외력 영향을 배제한 조건에서 수행되었음에도, 동일 시기에 건조된 아라호의 실선 시험 결과와 일치하는 경향을 보였다는 점에서, 본 연구의 시뮬레이션 및 모형 시험 결과의 신뢰성과 타당성이 입증된 것으로 판단된다.

시뮬레이션과 모형 시험 간의 상관성을 분석한 결과, 전반적인 궤적과 경향성은 매우 유사하게 나타나 Shipgen을 활용한 성능 추정 모델의 신뢰성과 타당성을 확보할 수 있었다. 다만, 선회횡거(transfer) 구간에서 발생한 미세한 차이와 20°/20° zig-zag test에서의 overshoot angle의 편차가 발생한 점은 모형 시

험이 실제 물리적인 타력 및 추진기 후류의 효과를 직접 반영하는 반면, 시뮬레이션은 이론적 모델을 기반으로 이러한 힘을 계산하기 때문에 발생된다고 판단된다. 특히 타각이 커질수록 발생하는 복잡한 유동 현상은 시뮬레이션이 실제 물리 현상을 완벽히 구현하는데 한계가 있음을 보여준다. 이로 인해 수치적 오차가 커지는 20°/20° zig-zag test에서 두 환경 간의 데이터 편차가 더욱 두드러지게 나타난 것으로 분석된다.

본 연구의 10°/10° zig-zag test에서 1st overshoot angle이 IMO 기준을 근소하게 초과하거나 경계치에 형성된 결과는 flap rudder가 장착된 선박의 전형적인 조종 성능 특성을 대변한다. Flap rudder 선회 성능은 매우 우수하지만, 반대로 변침 및 침로 안정성 측면에서는 민감한 반응으로 인해 다소 불리할 수 있다는 이전 연구 Lee et al. (2001)와 부합한다. 일반적으로 overshoot angle이 크면 조타 응답이 느려 침로 유지에는 이점이 있을 수 있으나 급격한 방향 전환에는 취약하며, 반대로 overshoot angle이 작을수록 조타 입력에 민감하게 반응하여 기동성이 향상된다. 본 연구에서 two pump 시스템 적용 시 overshoot angle이 감소했다는 점은 조타 응답의 정밀도를 높여 과도한 선회 반응을 효율적으로 억제할 수 있음을 입증하며, 어업실습선 새동백호는 수선 간장 100 m 미만으로 IMO 조종 성능 기준의 의무 적용 대상은 아니지만, 결과적으로 모든 지표에서 IMO 기준을 대부분 만족하는 안정적인 조종 성능을 나타냈다. 결론적으로 two pump 시스템은 우수한 기동성과 조타 안정성을 동시에 제공하는 효과적인 제어 방식이며, 조선자는 협수로나 긴급 상황에서 이러한 특성을 적극적으로 반영한 운항 전략을 수립하여 본선의 안전 운항을 도모해야 할 것이다.

본 연구의 결과는 또한 실선 시험을 포함한 추가 연구의 필요성을 보여준다. 항해 환경의 복잡성을 고려할 때, 시뮬레이션 및 모형 시험 데이터만으로는 실제 해역에서의 변수를 완벽히 규명하기에 한계가 있을 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 시뮬레이션 및 모형 시험과 동일한 조건으로 실선 시험을 추가 수행하여, 실제 운항 환경에서의 조종 성능을 비교·검증할 계획이다. 본 연구의 결과는 향후 유사한 선행을 가진 실습선과 어선의 설계뿐만 아니라, 조종 성능 평가 체계 확립을 위한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Ahn JY, Kim KI, Kim MS and Lee CH. 2020. Evaluation of the maneuverability of a real ship with flap rudder. J Korean Soc Fish Ocean Technol 56, 172-182. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2020.56.2.172>.
- Cho SR, Yun KH, Lee YJ and Park JH. 2024. Free running model tests for estimating the maneuverability of underwater vehicles under surface condition. J Soc Nav Archit Korea 61, 508-516. <http://doi.org/10.3744/STAK.2024.61.6.508>.
- IMO (International Maritime Organization). 1993. Interim Standards for Ship Manoeuvrability. IMO Resolution A.

- 751(18), 1-5.
- IMO (International Maritime Organization). 2002. Standards for Ship Manoeuvrability. IMO Resolution MSC 137(76), 1-6.
- Kim HS and Molyneux D. 2008. Maneuvering experiments in ice on a single screw tanker. *J Soc Nav Archit Korea* 45, 495-501. <http://doi.org/10.3744/SNAK.2008.45.5.495>.
- Kim JC, Kang IK, Lee JH, Ham SJ, Park CW and Kim SH. 2017. The maneuvering characteristics of the research vessel NARA equipped with the azimuth thruster system. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 53, 276-285. <http://doi.org/10.3796/KSFT.2017.53.3.276>.
- Kim SH, Lee CK and Lee YW. 2021. Estimation of maneuverability of fisheries training vessel BAEK-KYUNG using numerical simulation method. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 57, 246-255. <http://doi.org/10.3796/KS-FOT.2021.57.3.246>.
- Kim YG, Kim SY, Byun SH, Kim GY, Son NS and Kim EC. 2002. Prediction of maneuverability of high-speed medium size container ship by free running test. *J Ocean Eng Technol* 33, 127-134.
- Kim YG, Yeo DJ, Kim SY, Yun KH and Oh BI. 2009. Prediction of maneuverability of KCS by CPMC captive model test. *J Soc Nav Archit Korea* 46, 553-561. <http://doi.org/10.3744/SNAK.2009.46.6.553>.
- Kopp PJ. 1993. Mathematical model for a real time ship maneuvering, station-keeping, naval surface Warfare and sea-keeping training simulator. Carderock Division Naval Surface Warfare Center Rep CRDKNSWC-HD-1427-01, 1-24.
- Lee CK, Ryu KJ, Lee YW and Kim SH. 2024a. Evaluation of the maneuverability of the fisheries training ship Baek-Kyung. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 60, 179-185. <http://doi.org/10.3796/KSFOT.2024.60.2.179>.
- Lee HY, Shin SS, Park HS and Park JH. 2001. Maneuvering performances of a ship with flap rudder. *J Korean Soc Mar Environ Energy* 4, 70-74.
- Lee SH and Yang KK. 2025. Numerical comparison of two rudder configurations for underwater vehicle maneuverability. *J Soc Nav Architect Korea* 62, 363-372. <http://doi.org/10.3744/SNAK.2025.62.6.363>.
- Lee SW, Kim SH., Kim HW, Yoon HS, Song CW and Oh JH. 2024b. Evaluation of maneuverability of small fishing vessels based on CFD simulation under standard loading condition. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 30, 348-357. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2024.30.4.348>.
- Matsumoto K and Suemitsu K. 1980. The prediction of manoeuvring performances by captive model tests. *J Kansai Soc Nav Archit Jpn* 176, 11-22. https://doi.org/10.14856/kansaiks.176.0_11.
- SSPA (Swedish State Shipbuilding Experimental Establishment). 2017. G/T 2,000-ton Class Fisheries Training Ship Manoeuvring Model Tests. SSPA Report, RE20157660-03-00-A, 1-98.
- Sung YJ and Park SH. 2015. Prediction of ship manoeuvring performance based on virtual captive model tests. *J Soc Nav Archit Korea* 52, 407-417. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2015.52.5.407>.
- Yasukawa H. 1992. Numerical calculation of steady turning performance of a thin ship. *J Soc Nav Archit Jpn* 774, 878-883. https://doi.org/10.14856/technom.774.0_878.
- Yasukawa H and Yoshimura Y. 2015. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *J Mar Sci Technol* 20, 37-52. <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0293-y>.